

走滑断裂百万年时间尺度位移量估计及其在阿尔金断裂系中的应用

黄飞鹏, 张会平, 熊建国, 赵旭东
HUANG Feipeng, ZHANG Huiping, XIONG Jianguo, ZHAO Xudong

中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029
State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

HUANG F P, ZHANG H P, XIONG J G, et al., 2021, Estimation of displacements along strike-slip fault on a million-year timescale: A case study of the AltynTagh fault system [J]. Journal of Geomechanics, 27 (2): 208-217. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.02.020

Abstract: Fault slip rate matters not only as one of the important parameters for quantitative study of Cenozoic tectonics but also a key element in geodynamic research. However, most studies have focused on the long-term (>Ma) cumulative displacement of geological mass, short-time (since the late Quaternary) dislocation of geomorphic units as well as annual-decadal geodetic observations, and few people studied the fault displacement on a timescale in between, leaving a gap in understanding the evolutionary history of fault on a million-year timescale. Since the strike-slip fault breaks the system of alluvial fans and their catchment basins, causing the spatially uneven distribution of residual offset alluvial fans along the fault direction, we proposed three methods to determine the large-scale cumulative displacement of strike-slip fault based on the offset alluvial fans. The first method commonly presents a correspondence between the alluvial-fan area and catchment basin area as $A_f = \gamma A_c$ (A_f is the alluvial-fan area, A_c is the catchment basin area, γ is a constant 0.5 ± 0.35), which leads us to determine the strike-slip displacement of the offset basin by identifying whether the correspondence is unusual. The second method helps us to get the strike-slip displacement by distinguishing geomorphic units with the same lithological mineral components distributed at both sides of the fault. The third is to measure the strike-slip displacement by comparing the residual geomorphic unit with the corresponding stream outlet. In this study, we applied the above three methods to study the strike-slip displacement of the AltynTagh fault system on a million-year timescale, and to estimate the formation age of these geomorphic units based on the exiting fault slip-rate. It is further verified that the estimation methods proposed in this paper can provide a new angle and technical solution to accurately determine the evolution history of the strike-slip fault on a million-year scale.

Key words: fault-slip rate; cumulative displacement; alluvial fan; strike-slip fault; AltynTagh fault system

摘 要: 断裂滑动速率不仅是新生代构造定量研究的重要参数之一, 也是地球动力学研究的重要组成部分。但现有研究普遍缺乏介于长时间尺度 (>Ma) 地质体累积位移和短时间尺度 (晚第四纪以来) 地貌单元位错以及年—十年尺度的大地测量观测之间的断裂位移量, 从而造成了理解百万年时间尺度下断裂演化历史的空区。由于走滑断裂破坏了山前洪积扇与其汇水盆地组成的系统, 残留的断错洪积扇会沿断裂走向在空间上不

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41761144071); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0704)
This research is financially supported by the National Natural Science Foundation (Grant No. 41761144071), and the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (Grant No. 2019QZKK0704)
第一作者简介: 黄飞鹏 (1993—), 男, 在读博士, 主要从事活动构造与构造地貌学研究。E-mail: huangfeipeng5@gmail.com
通讯作者: 张会平 (1978—), 男, 博士, 研究员, 主要从事构造地貌学研究。E-mail: huiping@ies.ac.cn
收稿日期: 2020-10-27; **修回日期:** 2021-01-10; **责任编辑:** 范二平
引用格式: 黄飞鹏, 张会平, 熊建国, 等, 2021. 走滑断裂百万年时间尺度位移量估计及其在阿尔金断裂系中的应用 [J]. 地质力学学报, 27 (2): 208-217. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.02.020

均匀地展布。据此提出3种利用断错洪积扇确定走滑断裂大规模累积位移量的方法。第一,洪积扇面积与汇水盆地面积一般符合 $A_f = \gamma A_c$ (A_f 为洪积扇面积, A_c 为汇水盆地面积, γ 为常数 0.5 ± 0.35)对应关系,利用二者之比是否异常,获得断裂位错流域盆地走滑位移量;第二,利用断裂两盘的河流上下游分布相同岩性矿物组分,识别两盘对应地貌单元获得走滑位移量;第三,利用地貌单元残留标志与上游物源河道进行对比,估算走滑位移。同时,将上述3种方法应用于研究阿尔金断裂系百万年时间尺度以来的走滑位移量实例中,在现有速率分布前提下,可估算出地貌体的形成年龄,进一步验证了文中提出的走滑位移量估计方法能为精确厘定走滑断裂百万年尺度的演化历史提供新的解决途径和技术方法。

关键词: 断裂滑动速率;累积位移;洪积扇;走滑断裂;阿尔金断裂系

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A

0 引言

走滑断裂系统是调节大陆内部构造变形的重要组成部分,定量获取这些断裂的活动历史及其速率是大陆动力学研究的基础,同时也能深入了解大陆岩石圈变形机制以及其随时间演化的过程(Peltzer et al., 1989; 李海兵等, 2001; Tapponnier et al., 2001; Zhang et al., 2007; Molnar and Dayem, 2010; 肖泽坤和童亨茂, 2020)。大陆内部走滑断裂的滑动速率是认识岩石圈变形必需的参数之一(崔军文等, 1999, 2002; 陈文彬和徐锡伟, 2006; Molnar and Dayem, 2010)。以青藏高原为例,走滑断裂较高的滑动速率通常被解读为“大陆逃逸模式”,该模式认为大陆构造变形主要沿着大型走滑断裂运动,并通过一系列断裂分割的刚性块体的横向滑移来实现,变形主要发生在块体边界断裂带上(Molnar and Tapponnier, 1975; Tapponnier et al., 1982; Peltzer and Tapponnier, 1988; Avouac and Tapponnier, 1993; 陈文彬和徐锡伟, 2006),而断裂间块体表现为刚性不遭受变形。而以走滑断裂具有较低滑动速率的“连续变形模式”则认为,印度和欧亚板块的会聚大多为岩石圈的增厚所吸收,大陆变形以缩短和变厚为主要特征(England and Houseman, 1986; Houseman and England, 1993; 张培震等, 2002, 2004; Zhang et al., 2004, 2007)。其强调构造变形不仅局限于主要的边界断裂带附近,而是地壳物质侧向挤出量较小,变形以分布式为特征(Houseman and England, 1993; England and Molnar, 1997; 张培震等, 2002, 2013)。

定量获得走滑断裂在地质历史时期的活动历史及其速率,很大程度上也取决于对走滑位移量的估计、以及现有与残存构造位移标志的研究,这些位移标志可以用于认识和分析断裂位错区的

性质。沿走滑断裂两盘被位错的特征地质体,如岩浆岩、地层界线等,通常是长时间尺度断裂累积位移量恢复的良好标志,被用来限制较长地质历史,如中新世或更老的断裂位移量(Yue and Liou, 1999; Yue et al., 2005)。而较为年轻的地貌单元,如冲沟、阶地、冰碛物等,大多被用来限定晚第四纪以来的小幅度位移。可作为走滑位移标志的地貌特征主要有河流(冲沟)阶地和冲洪积扇,上述这两种位错标志在区域范围内有一定的代表性和可对比性(Weldon II and Sieh, 1985; Rockwell, 1988; Avouac and Tapponnier, 1993; Lavé and Avouac, 2000)。从已有资料综合来看,现有研究普遍缺乏介于长时间尺度(>Ma)地质体累积位移和短时间尺度(晚第四纪以来)微地貌单元位错以及年—十年尺度的大地测量观测之间的断裂位移量,特别是上新世—更新世走滑断裂位移量的数据,因此构成了理解走滑断裂长期、短期演化历史的“空区”,亟需对大型走滑断裂介于长短时间尺度内,即上新世—更新世,走滑断裂位移量及其速率开展研究,为理解走滑活动断裂的活动习性提供参考,进而有利于防治和减轻地质灾害(白永健等, 2019)。

1 走滑断裂位错常规标志

可识别的断错标志对于测量构造活动所形成的变形量是很重要的。最好的地貌标志是容易识别的面状和线性地貌,并具有3个特征:可知原始未变形的几何形态,可测得形成年代和在研究的构造活动时间尺度内具有高保存潜力(Burbank and Anderson, 2012)。

1.1 面状地貌

常用于活动构造或新构造研究的面状地貌包括海岸或河流阶地、海滩、海洋或湖泊三角洲、

洪积扇、熔岩流、碎屑流、崩塌碎屑物和夷平面。海洋与陆地之间的海岸阶地、海滩,有利于认识海平面变化,而且如果能理清阶地和曾经的海平面之间的关系,就能获得垂直变形速率 (Lambeck and Chappell, 2001; Mccaveney et al., 2006)。

海洋或者湖泊形成的三角洲能记录曾经的水平面变化 (Thorson, 1989)。利用河流阶地恢复沉积-侵蚀循环过程也能揭示气候或者构造变化事件 (Thompson et al., 2002; Pan et al., 2003)。由于洪积扇具有坡度向扇缘递减和纵剖面呈上凹型的特征,而且容易识别出断裂作用所形成的位移,也被作为一个重要的地貌标志 (Lee et al., 2001)。熔岩流具有易保存和放射性测年方法可直接获得年龄的特点,是一种极好的地貌标志。碎屑流和崩塌碎屑物部分取决于沉积时的含水量与粘度,其中采集到的测年物质所获得的年龄非常接近沉积年龄,是响应瞬时事件的地貌标志 (Whipple and Dunne, 1992)。另外,由于长期处于构造活动平静期,仅遭受侵蚀作用而形成低起伏的夷平面,它与邻近构造活动形成的高起伏地貌面一起不仅能反映长时间尺度下的构造抬升量,也能校正位于该夷平面之下的侵蚀量,并能评估抬升基岩面的切割过程 (Oskin and Burbank, 2005; Goode and Burbank, 2011)。

1.2 线性地貌

常用于活动构造或新构造研究的线状地貌包括海岸线、湖岸线、冰碛垄、河道和山脊,甚至包括一些人造景观。断错的面状地貌更适合解释区域上的变形,而线性地貌,如冰川搬运碎屑物时所形成的长条状地貌——冰碛垄,则是可以用来清楚地测量位移的理想标志,其记录的侧向位移可以从走向上的位移测得,垂直位移则可根据断层两盘的地形高差获得 (Chevalier et al., 2005; Owen et al., 2008)。而湖岸线则用于研究地方性的湖盆或者封闭性构造盆地的收缩所导致的地壳反弹效应 (Adams et al., 1999; Caskey and Ramelli, 2004),甚至可以用于限定断裂滑动速率 (Shi et al., 2014)。走滑断裂断错的河道和山脊也可以清晰地记录横向的位移。由于断裂的走滑运动,河流在穿过断层时突然终止,成为断头河,而山脊则会被断错甚至形成闸门脊 (Frankel et al., 2007; Zielke et al., 2010)。

除了自然条件下形成的线性地貌之外,还有

许多人造景观,比如铁路、公路、车痕、人行道、围栏,都可以用来测量构造变形量,并作为最近地震形成的同震位移,用来丰富断层破裂带最新的位移数据库。

2 走滑位移量估算新方法

确定长期断裂位移量的难题常常是不易找到合适的地貌标志。洪积扇是暂时性山地水流在出山口堆积形成的扇形地貌,往往是山体阶段性隆升与气候变化相互耦合的产物,尤其在干旱—半干旱地区普遍发育。在一定区域范围内洪积扇的发育具有同期性的特征,因此洪积扇常常作为活动构造研究的媒介 (徐锡伟等, 2003; 付碧宏等, 2006)。基于洪积扇扇体和断裂的空间交切关系,恢复晚第四纪走滑断裂水平滑动位移的模式已被广泛应用到断裂滑动速率研究中 (Van Der Woerd et al., 2006; Fletcher et al., 2011; 黄飞鹏等, 2018)。但是在实际研究过程中,洪积扇总会受到后期的改造作用,使得洪积扇的边界变得模糊不清。因此,如果利用残留的断错洪积扇结合其上游汇水盆地,则可以恢复走滑断裂上的大规模水平位移量,进而填补长期走滑速率研究的不足。

2.1 异常洪积扇体分布溯源

Dade and Verdeyen (2007) 利用统计学方法分析了分布在美国、意大利、阿根廷、西班牙、波利维尔、印度和火星上的 255 个洪积扇,假设所涉及到的地貌单元都处于稳定状态,上游汇水盆地处于空间上均一的构造、岩性和气候条件,并保存有良好的河谷结构,获得了洪积扇与它对应的汇水盆地存在数学关系: $A_f = \gamma A_c$, 其中 A_f 为洪积扇面积, A_c 为汇水盆地面积, γ 为常数 0.5 ± 0.35 。即洪积扇面积与其对应的汇水盆地面积大小相近,如果相差较大,则可能是构造活动导致的结果 (Poussebeltran et al., 2017)。因此,通过对断错洪积扇填图,并从数字高程数据中提取上游汇水盆地,计算出两者的面积进行比较,则可恢复断裂的走滑位移量,最终获得断裂走滑速率。

如图 1 中所示,汇水盆地 A 的规模大于洪积扇 a,而汇水盆地 C 的规模远远小于洪积扇 c,根据上述的关系式,则可判断出这一区域明显存在地貌异常,即存在水平运动的影响,导致洪积扇体的分布异常。

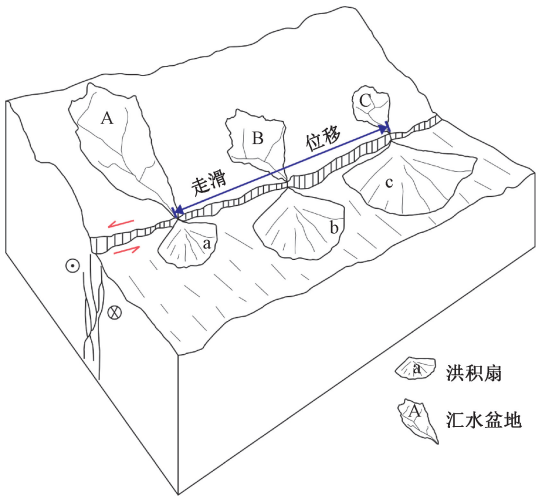


图 1 断错洪积扇与上游汇水盆地异常分布恢复位移模式

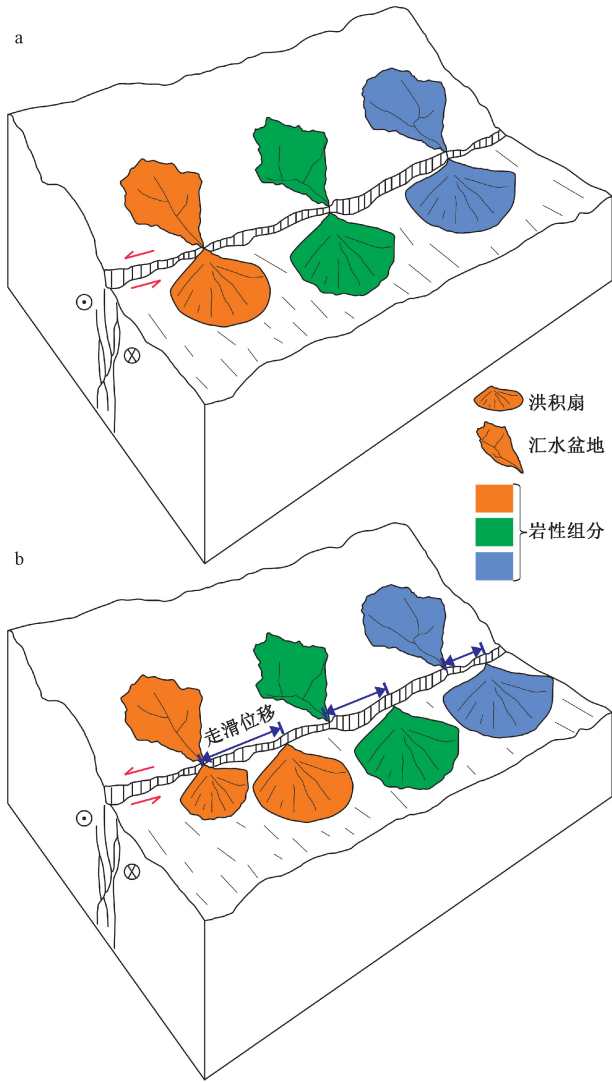
Fig. 1 Displacement restored by the abnormally distributed offset alluvial fans and upstream catchments

2.2 源汇物质组成示踪

虽然走滑断裂断错的洪积扇与其上游河道之间的位错量无法用常规的地貌恢复方法进行有效限定, 然而考虑到沿断裂走向上沉积物的岩性矿物组分可能存在一定的差异, 如图 2 所示, 山前洪积扇经走滑断裂断错后, 累积的大规模位错已超过现今河谷位置, 那么, 通过对断错洪积扇的岩性与其可能的上游河道内沉积物岩性进行对比分析, 可以有效地解决洪积扇位错超过沟谷间距的问题。Ginat et al. (1998) 曾利用识别 JabalRisha 洪积扇上砾石成分, 对比上游源区并成功追索了断裂位错幅度。这种利用岩性矿物组分对比分析的方法, 很大程度上回避了由于后期侵蚀作用对地貌位错标志造成的不确定性, 同时其对洪积扇位错超过沟谷间距等也能够较好地识别, 因此将拓展获取超过约 1 km 的大尺度位错, 进而大大填补现有上新世—更新世断裂走滑速率的“空白”。

而且在气候干旱、植被稀少地区, 多光谱卫星图像数据可以用来高效、快速地对断错洪积扇及其补给沟谷区进行岩性矿物组分填图。现有研究实验表明, 多光谱短波红外 (波长范围: 1.6 ~ 2.5 μm) 和热红外 (波长范围: 8.0 ~ 12.0 μm) 卫星图像可以用来测绘地表岩性矿物组分 (Sultan et al., 1987; Khan and Glenn, 2006) 以及沉积物的岩性属性。不同种类的岩石所含矿物种类及化学特征的差异, 会导致短波红外反射率和热红外波段的发射率出现相应的特征差异 (傅碧宏等,

1994; 燕守勋等, 2003), 利用星载多光谱传感器可以探测这些来自不同岩性区的沉积地貌单元, 在特征波段融合显示之后, 可以获得探测范围内的岩性组分分布图像 (图 2)。由于该方法不受沉积物年龄和岩石风化程度、破碎程度的影响 (Gillespie et al., 1984), 因此, 通过使用高分辨率多光谱卫星短波红外-热红外 (英文简称为 SWIR-TIR) 图像数据, 进行活动断裂附近基岩、洪积扇岩性矿物组分填图, 建立跨断裂上游源区、下游堆积区的位错联系, 进而定量估算断裂的位移幅度及走滑速率。



a—断裂未发生水平运动形成洪积扇; b—断裂发生水平运动断错洪积扇

图 2 断裂两盘分布相同岩性矿物组分恢复位移模式

Fig. 2 Displacements restored by the same lithological mineral composition at both sides of the fault. (a) Alluvial fans formed without the horizontal movement of the fault. (b) Offset alluvial fans with the horizontal movement of the fault

欧盟委员会和欧洲航天局于 2015 年 6 月 23 日发射的哨兵-2A 号是一颗高分辨率多光谱成像卫星，其携带一枚多光谱成像仪，高度为 786 km，可覆盖 13 个光谱波段，幅宽达 290 km，其中近红外波段 8A、短波红外波段 11 与 12 一起组合作为特征波段，可提取目标区域内地表岩性矿物组分的分布情况，进而获得断错洪积扇的水平位移。

2.3 残存地貌体位移恢复

在出山口形成的冲洪积地貌体被山前展布的走滑断裂，尤其是活动历史很长的岩石圈断裂错断之后，不断远离原来的位置，由于气候与地表过程的长期作用，这些断错地貌体并不能得到完整保存。而且，这些断错地貌体的上游并不发育河道，或者现存的邻近上游河道并不能提供物源，那么，寻找正确的和对应的上游河道，并将残存的地貌体与其相应的上游河道出山口之间的距离进行测量，则可以获得断裂长期活动以来的累积位移量（图 3），这对重建断裂的长期活动历史具有重要意义。

3 走滑断裂实例应用

上述洪积扇的演化过程对断裂走滑位移响应的分析表明，有 3 种利用洪积扇与汇水盆地相结合确定走滑断裂累积位移量的方法：利用洪积扇面积与汇水盆地面积之比是否相近获得走滑位移；利用断裂两盘的河流上下游分布相同岩性矿物组

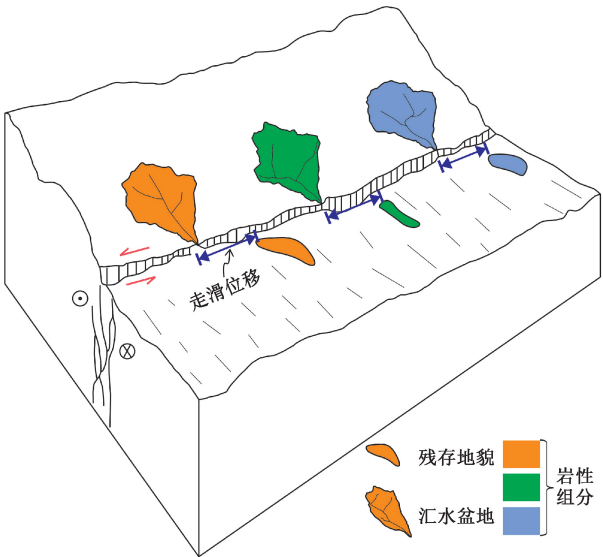


图 3 残存地貌体恢复位移模式

Fig. 3 Displacements restored by the remnant landform

分的地貌单元获得走滑位移；利用残留地貌单元与物源河道进行对比获得走滑位移。

文中主要以阿尔金断裂系为例，进行走滑断裂大规模走滑位移恢复的探讨研究。阿尔金断裂系的主要组成包括阿尔金断裂、且末河隐伏断裂、亚门-柳什断裂、江孜勒萨依断裂、红柳沟断裂、塞力克沙依断裂和三危山断裂等（国家地震局《阿尔金活动断裂带》课题组，1992），其中，阿尔金断裂和三危山断裂是以左旋走滑运动为主的晚第四纪活动断裂（图 4）。

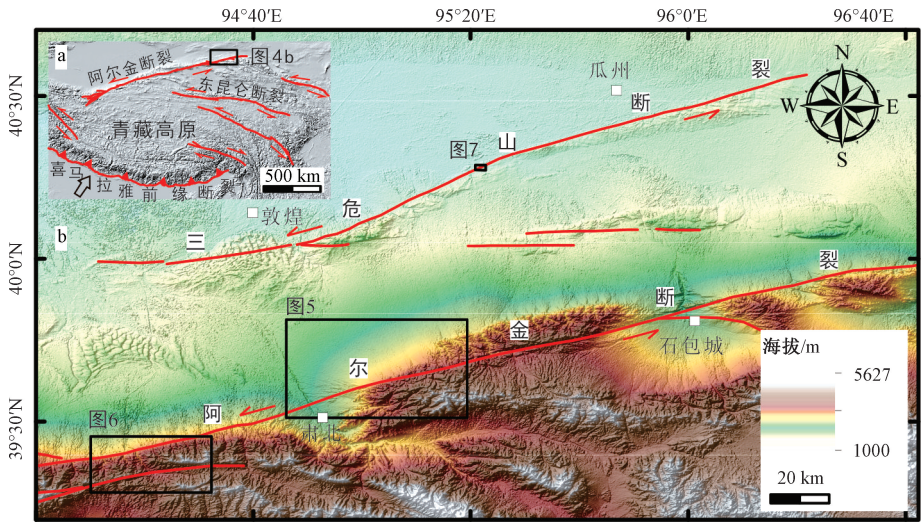


图 4 研究区地貌简图

Fig. 4 Geomorphological sketch of the study area

3.1 利用洪积扇面积与汇水盆地面积之比获得走滑位移

阿尔金断裂是青藏高原北部边界, 自西藏北部的郭扎错至甘肃玉门的宽滩山, 总体走向北东东, 全长约 1600 km。其北缘断裂民主乡段沿山前穿过, 表现出明显的线性特征, 并断错一系列河流和冲沟, 相关学者在该处获得全新世以来的累积位移量为 20~300 m, 走滑速率约为 10 mm/a (Mériaux et al., 2005; Xu et al., 2005; 徐锡伟等, 2007; Zhang et al., 2007; Chen et al., 2012, 2013)。

通过查看卫星影像和大比例尺地质图, 对肃北县东侧野马山山前的洪积扇分布情况进行了解译, 发现最西侧的洪积扇 (面积为 42.09 km²) 和其最近的上游汇水盆地 (9.74 km²; 图 5) 之间存在明显的不匹配 (比值为 4.32), 已显著大于 Dade 和 Verdeyen (Dade and Verdeyen, 2007) 提出的经验值。考虑到阿尔金断裂明显左旋断错此处的一系列河谷, 推测残留洪积扇的累积位移量约为 16 km, 根据相关学者在附近地区获得的走滑速率约 10 mm/a, 则可估计出该断错洪积扇的形成年代约为 1.6 Ma。

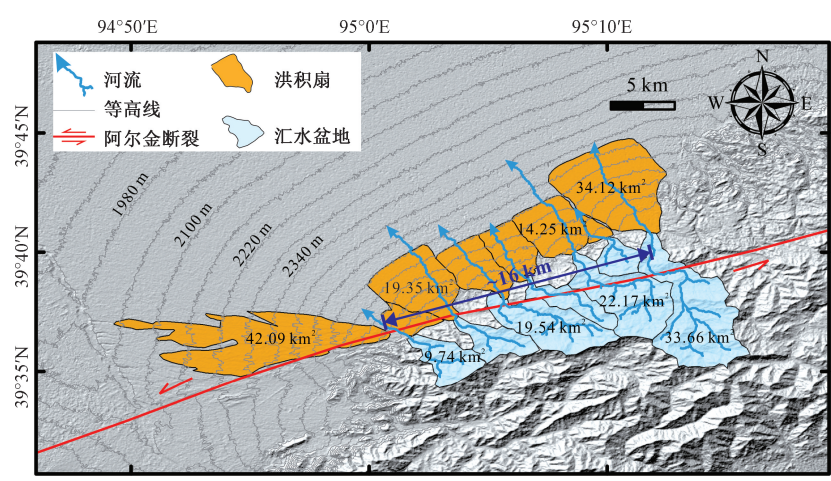


图 5 野马山山前洪积扇与汇水盆地分布

Fig. 5 Distribution of the alluvial fans and catchment areas in the Yemashan piedmont

3.2 利用断裂两盘的河流上下游分布相同岩性矿物组分获得走滑位移

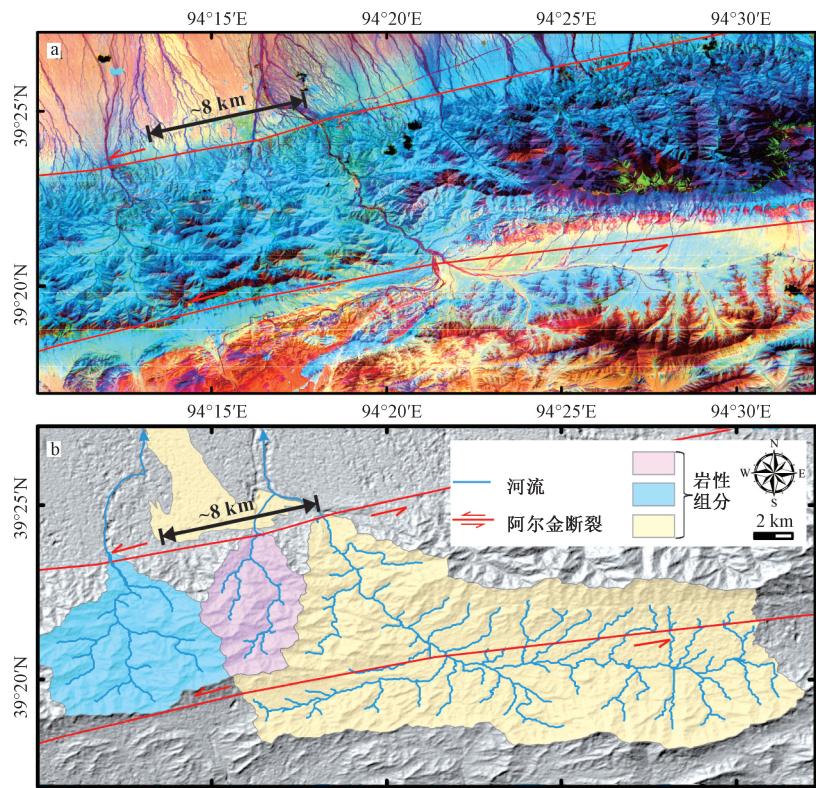
利用软件 ENVI5.3 的色彩拉伸和饱和度拉伸功能处理哨兵 2A 的多光谱数据, 能够获得阿尔金断裂在阿克塞县民主乡附近的岩性矿物成分分布的大致范围图, 并利用 Arcgis 的水文分析模块提取这一区域的河网与上游汇水盆地, 从图 6 可以直观地观察到相同波谱特征的区域在断裂两侧分布情况, 因此, 通过比对沿断裂两侧相同来源的岩性区域, 获得了约 8 km 的走滑位移, 根据相关学者给出的断裂走滑速率结果约 10 mm/a, 假定断裂走滑速率长期以来保持稳定, 则可获得该断错地貌单元的形成年代约为 0.8 Ma, 虽然所获得结果的精度可能不高, 但对于千米级别以上的位错量, 所采用的处理方法所产生的误差是可以忽略不计的。当然, 为了更准确地限定断错地貌的可靠来源, 可以考虑利用传统的物源示踪方法, 比如碎

屑锆石 U/Pb 年代学、重矿物分析方法 (程瑜等, 2018)。

3.3 利用残存地貌体与物源河道获得走滑位移

三危山断裂是阿尔金断裂系重要的分支断裂之一, 位于青藏高原北缘北向生长的前端, 为左旋走滑兼逆冲的活动断裂, 西起西水沟, 向东至双塔水库附近, 走向与阿尔金断裂近平行, 全长约 150 km。云龙等 (2016) 通过测量三危山山前断错冲洪积扇上的纹沟 (1.7~5.5 m), 获得晚更新世 (20 ka) 以来的左旋走滑速率约 0.3 mm/a。

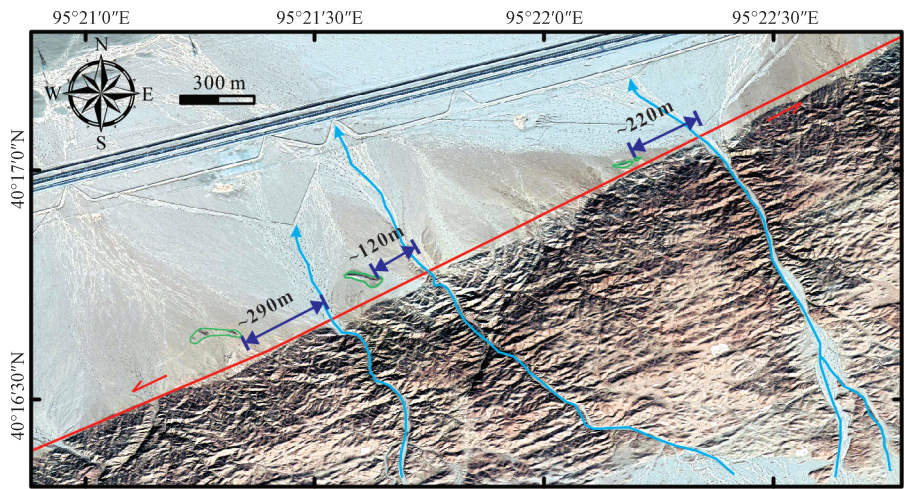
通过卫星影像解译 (图 7), 发现三危山山前存在 3 处残留的断错洪积扇 (图 7 中绿色区域), 与上游河道进行对比, 测量得出这三处断错地貌的水平位移自西向东分别为 290 m, 120 m 和 220 m, 若假定三危山断裂长期以来走滑速率保持稳定, 且为 0.3 mm/a, 则可估算这 3 处地貌单元的形成年龄分别为 0.97 Ma, 0.4 Ma 和 0.73 Ma。



a—哨兵-2A 卫星影像合成图像；b—岩性分布解译图

图 6 民主乡岩性组分分布与位移测量图

Fig. 6 Distribution of lithological mineral composition and displacement measurements at Minzhu village. (a) Composite graph of Sentinel-2A satellite image. (b) Interpretation of lithologic distribution



图中红线为三危山断裂，蓝线为河流，绿色区域为解译的断错洪积扇

图 7 三危山山前断错残存地貌单元

Fig. 7 Offset residual landform in the Sanweishan piedmont. Red line presents the Sanweishan fault, blue line the river, and green area the offset alluvial fans

4 结论

(1) 通过对洪积扇演化与断裂走滑位移响应

的分析，归纳得到 3 种利用洪积扇与汇水盆地确定走滑断裂大规模位移量的方法：①利用洪积扇面积与汇水盆地面积之比是否相近获得走滑位移限定断裂走滑速率；②利用断裂两盘的河流上下游

分布相同岩性矿物组分的地貌单元获得走滑位移;
③利用残留地貌单元与物源河道进行对比获得走滑位移。

(2) 文中以阿尔金构造系为例,分别应用上述3种方法,获得肃北县东侧野马山山前断错洪积扇累积走滑位移量约16 km,形成年代约为1.6 Ma;阿克塞县民主乡附近断错相同物源的岩性地貌单元走滑位移量约8 km,形成年代为0.8 Ma;三危山山前3处断错洪积扇累积走滑位移分别有290 m, 120 m和220 m,形成年代分别为0.97 Ma, 0.4 Ma和0.73 Ma,为下一步选择适当的测年方法,进而精确厘定每条断裂的长期走滑速率提供参考。

(3) 这3种方法虽然能快速确定大规模的走滑位移,但由于这些断错地貌体经历了长期的地表侵蚀作用,另外,在选择多光谱卫星数据进行矿物组分识别进而确定物源时,需要考虑到黄土对冲积地貌单元的遮蔽影响,这些因素都会导致获得的位移存在一定的误差,因此,在应用这些方法时,结合传统的沉积学、矿物学和元素地球化学方法,能大大提高结果的可靠性。

References

- ADAMS K D, WESNOUSKY S G, BILLS B G, 1999. Isostatic rebound, active faulting, and potential geomorphic effects in the Lake Lahontan basin, Nevada and California [J]. *GSA Bulletin*, 111 (12): 1739-1756.
- AVOUAC JP, TAPPONNIER P, 1993. Kinematic model of active deformation in central Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 20 (10): 895-898.
- BAI Y J, NI H Y, GE H, 2019. Advances in research on the geohazard effect of active faults on the southeastern margin of the Tibetan plateau [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (6): 1116-1128. (in Chinese with English abstract)
- BURBANK D W, ANDERSON R S, 2012. *Tectonic geomorphology* [M]. 2nd ed. Hoboken, NJ: Blackwell Publishing Ltd: 17-44.
- CASKEY S J, RAMELLI A R, 2004. Tectonic displacement and far-field isostatic flexure of pluvial lake shorelines, Dixie Valley, Nevada [J]. *Journal of Geodynamics*, 38 (2): 131-145.
- CHEN W B, XU X W, 2006. Sinistral strike-slip faults along the southern Alashan margin and eastwards extending of the Altun fault [J]. *Seismology and Geology*, 28 (2): 319-324. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Y W, LI S H, LI B, 2012. Slip rate of the Aksay segment of Altyn Tagh Fault revealed by OSL dating of river terraces [J]. *Quaternary Geochronology*, 10: 291-299.
- CHEN Y W, LI S H, SUN J M, et al., 2013. OSL dating of offset streams across the Altyn Tagh Fault: Channel deflection, loess deposition and implication for the slip rate [J]. *Tectonophysics*, 594: 182-194.
- CHENG Y, LI X Q, ZHAO Z Y, et al., 2018. Detrital zircon U-Pb ages and its provenance significance in the TZK3 core from the yangtze river delta [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (5): 635-644. (in Chinese with English abstract)
- CHEVALIER M L, RYERSON F J, TAPPONNIER P, et al., 2005. Slip-rate measurements on the Karakorum Fault may imply secular variations in fault motion [J]. *Science*, 307 (5708): 411-414.
- CUI J W, TANG Z M, DENG J F, et al., 1999. *Altun fault system* [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- CUI J W, ZHANG X W, LI P W, 2002. The Altun fault: its geometry, nature and mode of growth [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23 (2): 509-516. (in Chinese with English abstract)
- DADE W B, VERDEYEN M E, 2007. Tectonic and climatic controls of alluvial-fan size and source-catchment relief [J]. *Journal of the Geological Society*, 164 (2): 353-358.
- ENGLAND P, HOUSEMAN G, 1986. Finite strain calculations of continental deformation: 2. Comparison with the India-Asia Collision Zone [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91 (B3): 3664-3676.
- ENGLAND P, MOLNAR P, 1997. Active deformation of Asia: from kinematics to dynamics [J]. *Science*, 278 (5338): 647-650.
- FLETCHER K E K, ROCKWELL T K, SHARP W D, 2011. Late Quaternary slip rate of the southern Elsinore fault, Southern California: Dating offset alluvial fans via $^{230}\text{Th}/\text{U}$ on pedogenic carbonate [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116 (F2): F02006.
- FRANKEL K L, BRANTLEY K S, DOLAN J F, et al., 2007. Cosmogenic ^{10}Be and ^{36}Cl geochronology of offset alluvial fans along the northern Death Valley fault zone: Implications for transient strain in the eastern California shear zone [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112 (B6): B06407.
- FU B H, CHOU X W, 1994. Study of thermal infrared spectra features of typical sedimentary rocks from Kalpin uplift in Tarim basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12 (4): 95-100. (in Chinese with English abstract)
- FU B H, ZHANG S L, XIE X P, et al., 2006. Late Quaternary tectono-geomorphic features along the Kangxiwar fault, altyn Tagh fault system, Northern Tibet [J]. *Quaternary Sciences*, 26 (2): 228-235. (in Chinese with English abstract)
- GILLESPIE A R, KAHLE A B, PALLUCONI F D, 1984. Mapping alluvial fans in Death Valley, California, using multichannel thermal infrared images [J]. *Geophysical Research Letters*, 11 (11): 1153-1156.
- GINAT H, ENZEL Y, AVNI Y, 1998. Translocated Plio-Pleistocene drainage systems along the Arava fault of the Dead Sea transform [J]. *Tectonophysics*, 284 (1-2): 151-160.
- GOODE J K, BURBANK D W, 2011. The temporal evolution of minor channels on growing folds and its bearing on fold kinematics [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116 (B4): B04407.
- HOUSEMAN G, ENGLAND P, 1993. Crustal thickening versus lateral

- expulsion in the Indian-Asian continental collision [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98 (B7): 12233-12249.
- HUANG F P, REN J J, LV Y W, et al., 2018. Late Quaternary slip rate of the Xiugou segment, Eastern Kunlun fault zone [J]. *Advances in Earth Science*, 33 (3): 321-332. (in Chinese with English abstract)
- KHAN S D, GLENN N F, 2006. New strike-slip faults and litho-units mapped in Chitral (N. Pakistan) using field and ASTER data yield regionally significant results [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (20): 4495-4512.
- LAMBECK K, CHAPPELL J, 2001. Sea level change through the last glacial cycle [J]. *Science*, 292 (5517): 679-686.
- LAVÉ J, AVOUAC J P, 2000. Active folding of fluvial terraces across the Siwaliks Hills, Himalayas of central Nepal [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105 (B3): 5735-5770.
- LEE J, SPENCER J Q G, OWEN L A, 2001. Holocene slip rates along the Owens Valley fault, California; Implications for the recent evolution of the Eastern California Shear Zone [J]. *Geology*, 29 (9): 819-822.
- LI H B, YANG J S, XU Z Q, et al., 2001. The geological and geochronological evidence of ATF striking-slipping during Indosinian [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46 (16): 1333-1338. (in Chinese)
- MÉRIAUX A S, TAPPONNIER P, RYERSON F J, et al., 2005. The Aksay segment of the northern Altyn Tagh fault: Tectonic geomorphology, landscape evolution, and Holocene slip rate [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110 (B4): B04404.
- MCSAVENEY M J, GRAHAM I J, BEGG J, et al., 2006. Late Holocene uplift of beach ridges at Turakirae Head, south Wellington coast, New Zealand [J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 49 (3): 337-358.
- MOLNAR P, TAPPONNIER P, 1975. Cenozoic tectonics of Asia; effects of a Continental collision; features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision [J]. *Science*, 189 (4201): 419-426.
- MOLNAR P, DAYEM K E, 2010. Major intracontinental strike-slip faults and contrasts in lithospheric strength [J]. *Geosphere*, 6 (4): 444-467.
- OSKIN M, BURBANK D W, 2005. Alpine landscape evolution dominated by cirque retreat [J]. *Geology*, 33 (12): 933-936.
- OWEN L A, CAFFEE M W, FINKEL R C, et al., 2008. Quaternary glaciation of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Journal of Quaternary Science*, 23 (6-7): 513-531.
- PAN B T, BURBANK D W, WANG Y X, et al., 2003. A 900 k. y. record of strath terrace formation during glacial-interglacial transitions in northwest China [J]. *Geology*, 31 (11): 957-960.
- PELTZER G, TAPPONNIER P, 1988. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India-Asia Collision: An experimental approach [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93 (B12): 15085-15117.
- PELTZER G, TAPPONNIER P, ARMIJO R, 1989. Magnitude of late quaternary left-lateral displacements along the north edge of Tibet [J]. *Science*, 246 (4935): 1285-1289.
- POUSSE-BELTRAN L, VASSALLO R, AUDEMARD F, et al., 2017. Pleistocene slip rates on the Boconó fault along the North Andean Block plate boundary, Venezuela [J]. *Tectonics*, 36 (7): 1207-1231.
- Research Group of the Altyn Tagh Active Fault Zone, State Seismological Bureau, 1992. The Altyn Tagh active fault zone [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- ROCKWELL T, 1988. Neotectonics of the San Cayetano fault, transverse ranges, California [J]. *GSA Bulletin*, 100 (4): 500-513.
- SHI X H, KIRBY E, LU H J, et al., 2014. Holocene slip rate along the Gyaring Co Fault, central Tibet [J]. *Geophysical Research Letters*, 41 (16): 5829-5837.
- SULTAN M, ARVIDSON R E, STURCHIO N C, et al., 1987. Lithologic mapping in arid regions with Landsat thematic mapper data: Meatiq dome, Egypt [J]. *GSA Bulletin*, 99 (6): 748-762.
- TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, et al., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia; New insights from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 10 (12): 611-616.
- TAPPONNIER P, XU Z Q, ROGER F, et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau [J]. *Science*, 294 (5547): 1671-1677.
- THOMPSON S C, WELDON R J, RUBIN C M, et al., 2002. Late Quaternary slip rates across the central Tien Shan, Kyrgyzstan, central Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107 (B9): ETG 7-1-ETG 7-32.
- THORSON R M, 1989. Glacio-isostatic response of the Puget Sound area, Washington [J]. *GSA Bulletin*, 101 (9): 1163-1174.
- VAN DER WOERD J, KLINGER Y, SIEHK, et al., 2006. Long-term slip rate of the southern San Andreas Fault from ^{10}Be - ^{26}Al surface exposure dating of an offset alluvial fan [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111 (B4): B04407.
- WELDON II R J, SIEH K E, 1985. Holocene rate of slip and tentative recurrence interval for large earthquakes on the San Andreas fault, Cajon Pass, southern California [J]. *GSA Bulletin*, 96 (6): 793-812.
- WHIPPLE K X, DUNNE T, 1992. The influence of debris-flow rheology on fan morphology, Owens Valley, California [J]. *GSA Bulletin*, 104 (7): 887-900.
- XIAO Kunze, TONG Hengmao, 2020. Progress on strike-slip fault research and its significance [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (2): 151-166.
- XU X W, TAPPONNIER P, VAN DER WOERDJ, et al., 2003. Late Quaternary sinistral slip rate along the Altyn Tagh Fault and its structural transformation model [J]. *Science in China (Series D)*, 33 (10): 967-974. (in Chinese)
- XU X W, WANG F, ZHENG R Z, et al., 2005. Late Quaternary sinistral slip rate along the Altyn Tagh fault and its structural transformation model [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 48 (3): 384-397.
- XU X W, YU G H, CHEN G H, et al., 2007. Near-surface character of permanent geologic deformation across the mega-strike-slip faults in

the northern Tibetan plateau [J]. *Seismology and Geology*, 29 (2): 201-217. (in Chinese with English abstract)

YAN S X, ZHANG B, ZHAO Y C, et al., 2003. Summarizing the VIS-NIR spectra of minerals and rocks [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 18 (4): 191-201. (in Chinese with English abstract)

YUE Y J, LIOU J G, 1999. Two-stage evolution model for the Altyn Tagh fault, China [J]. *Geology*, 27 (3): 227-230.

YUE Y J, GRAHAM S A, RITTS B D, et al., 2005. Detrital zircon provenance evidence for large-scale extrusion along the Altyn Tagh fault [J]. *Tectonophysics*, 406 (3-4): 165-178.

YUN L, YANG X P, SONG F M, et al., 2016. Late Quaternary sinistral strike-slip activities of Sanwei shan fault in the north of Tibetan plateau [J]. *Seismology and Geology*, 38 (2): 434-446. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P Z, WANG Q, MA Z J, 2002. GPS velocity field and active crustal blocks of contemporary tectonic deformation in continental China [J]. *Earth Science Frontiers*, 9 (2): 430-441. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P Z, SHEN Z K, WANG M, et al., 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data [J]. *Geology*, 32 (9): 809-812.

ZHANG P Z, SHEN Z K, WANG M, et al., 2004. Kinematics of present-day tectonic deformation of the Tibetan plateau and its vicinities [J]. *Seismology and Geology*, 26 (3): 367-377. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P Z, MOLNAR P, XU X W, 2007. Late Quaternary and present-day rates of slip along the Altyn Tagh Fault, northern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 26 (5): TC5010.

ZHANG P Z, DENG Q D, ZHANG Z Q, et al., 2013. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 43 (10): 1607-1620. (in Chinese with English abstract)

ZIELKE O, ARROWSMITH J R, LUDWIG L G, et al., 2010. Slip in the 1857 and earlier large earthquakes along the Carrizo Plain, San Andreas Fault [J]. *Science*, 327 (5969): 1119-1122.

附中文参考文献

白永健, 倪化勇, 葛华, 2019. 青藏高原东南缘活动断裂地质灾害效应研究现状 [J]. *地质力学学报*, 25 (6): 1116-1128.

陈文彬, 徐锡伟, 2006. 阿拉善地块南缘的左旋走滑断裂与阿尔金断裂带的东延 [J]. *地震地质*, 28 (2): 319-324.

崔军文, 唐哲民, 邓晋福, 等, 1999. 阿尔金断裂系 [M]. 北京: 地质出版社.

崔军文, 张晓卫, 李朋武, 2002. 阿尔金断裂: 几何学、性质和生长方式 [J]. *地质学报*, 23 (2): 509-516.

程瑜, 李向前, 赵增玉, 等, 2018. 长江三角洲地区 TZK3 孔碎屑锆石 U-Pb 年龄及其物源意义 [J]. *地质力学学报*, 24 (5): 635-644.

傅碧宏, 丑晓伟, 1994. 塔里木盆地柯坪隆起典型沉积岩类的热红外光谱特征研究 [J]. *沉积学报*, 12 (4): 95-100.

付碧宏, 张松林, 谢小平, 等, 2006. 阿尔金断裂系西段: 康西瓦断裂的晚第四纪构造地貌特征研究 [J]. *第四纪研究*, 26 (2): 228-235.

国家地震局《阿尔金活动断裂带》课题组, 1992. 阿尔金活动断裂带 [M]. 北京: 地震出版社.

黄飞鹏, 任俊杰, 吕延武, 等, 2018. 东昆仑断裂带秀沟段晚第四纪滑动速率研究 [J]. *地球科学进展*, 33 (3): 321-332.

李海兵, 杨经绥, 许志琴, 等, 2001. 阿尔金断裂带印支期走滑活动的地质及年代学证据 [J]. *科学通报*, 46 (16): 1333-1338.

徐锡伟, 于贵华, 陈桂华, 等, 2007. 青藏高原北部大型走滑断裂带近地表地质变形带特征分析 [J]. *地震地质*, 29 (2): 201-217.

徐锡伟, TAPPONNIER P, VAN DER WOERDJ, 等, 2003. 阿尔金断裂带晚第四纪左旋走滑速率及其构造运动转换模式讨论 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 33 (10): 967-974.

肖坤泽, 童亨茂, 2020. 走滑断层研究进展及启示 [J]. *地质力学学报*, 26 (2): 151-166.

燕守勋, 张兵, 赵永超, 等, 2003. 矿物与岩石的可见: 近红外光谱特性综述 [J]. *遥感技术与应用*, 18 (4): 191-201.

云龙, 杨晓平, 宋方敏, 等, 2016. 青藏高原北缘三危山断裂晚第四纪以来的左旋走滑活动 [J]. *地震地质*, 38 (2): 434-446.

张培震, 王琪, 马宗晋, 2002. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度与活动地块 [J]. *地学前缘*, 9 (2): 430-441.

张培震, 沈正康, 王敏, 等, 2004. 青藏高原及周边现今构造变形的运动学 [J]. *地震地质*, 26 (3): 367-377.

张培震, 邓起东, 张竹琪, 等, 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程 [J]. *中国科学: 地球科学*, 43 (10): 1607-1620.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

